

論文 フライアッシュを多量に使用した高流動コンクリートの基礎的研究

成田 健*¹・成澤 謙伸*²・井上 和重*³・関野 一男*⁴

要旨：本研究は、フライアッシュを多量に使用した高流動コンクリートの鉄筋コンクリート構造物への適用可能性を把握することを目的に、土木学会に示す自己充てん性ランク 2 の条件におけるフライアッシュ置換率 0~70% の高流動コンクリートの圧縮強度、乾燥収縮、凍結融解抵抗性、急速塩化物イオン透過性、促進中性化および耐薬品性について検討した。

キーワード：フライアッシュ、高流動コンクリート、配合設計、強度特性、耐久性

1. はじめに

従来からフライアッシュ等の混和材の使用により、高流動の機能性を有するコンクリートが開発されている。しかし、フライアッシュの有効利用の観点から、そのコンクリートへの多量使用が検討されているものの、実用化段階には達していないのが現状である。

本研究は、フライアッシュを多量に使用した高流動コンクリートの実構造物への適用可能性を把握することを目的に、先に提案した配合設計法¹⁾を適用した高流動コンクリートの強度特性、乾燥収縮、中性化、耐凍害性、急速塩化物イオン促進透過性などの耐久性について検討した。

2. フライアッシュを多量に使用した高流動コンクリートの配合設計法

先に提案した設計方法は、図-1 に示すように岡村らが提案したハイパフォーマンスコンクリートの配合設計法²⁾に基づいており、使用する粉体(セメントとフライアッシュの混合物)の拘束水比および変形係数を把握することにより、構造物の条件に応じた、高流動コンクリートのランク 1, 2 および 3 に適合可能である。本設計法の概念を以下に述べる。

(1) フライアッシュ置換率の設定

本設計法では、フライアッシュを多量に使用する場合に、先ず、同類の既存の技術データや強度算定式から所要強度が得られるフライアッシュ置換率を設定することとした。

(2) フライアッシュ混合セメントの拘束水比の算定

本設計法では、(1) で選定した置換率の粉体を用いて、直接、対象とする粉体の拘束水比を実験により求めることとした。

(3) モルタルの最適水粉体容積比の設定

モルタルの最適水粉体容積比の選定は次の要領で行う。

① (2) で求めた対象とする粉体の拘束水比に定数を乗じて水粉体容積比を設定する。使用する細骨材容積比に応じて定数を仮設定する。

②①により仮設定した水粉体容積比のモルタルについて、高性能減水剤の添加量を変化させ、所要相対フロー面積比が得られるモルタルの相対ロート速度比を求める。その後、所要相対ロート速度比が得られれば、設定した水粉体容積比をコンクリートの水粉体容積比として採用する。一方、所要相対ロート速度比が得られないロート速度比が得られない場合には、水粉体容積比を調整して、

*1 東北電力㈱研究開発センター電源技術グループ主幹研究員 (正会員)

*2 東北電力㈱研究開発センター電源技術グループ研究員

*3 太平洋セメント㈱東北支店ゼロエミッション営業部係長

*4 ㈱太平洋コンサルタント研究センター開発グループリーダー 工博 (正会員)

所要相対ロート速度比が得られる水粉体容積比を選定する。

(4) 単位粗骨材絶対容積の設定およびコンクリート配合の決定

(社)土木学会「高流動コンクリートの施工指針」では、構造物の条件を自己充てん性のランク1, 2および3の3ランクに分け、それぞれのランクに応じて単位粗骨材絶対容積を定めている。本設計法においても、コンクリート中の単位粗骨材絶対容積は、構造物の条件に応じて暫定的に設定が可能である。

以上のような基本設計法を基にしたコンクリート配合の最終決定は、試し練りにより行うこととした。

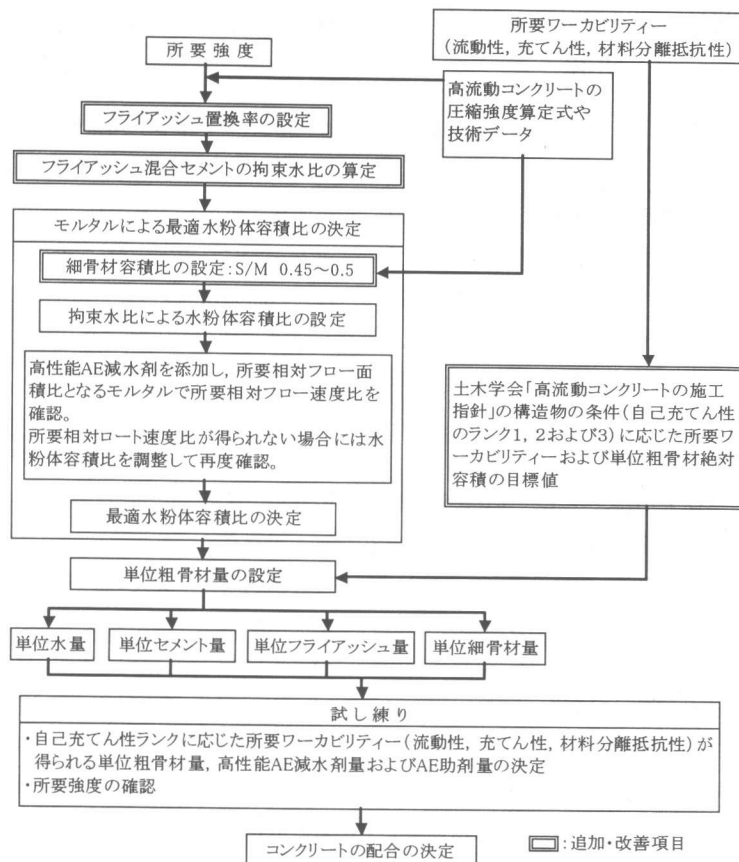


図-1 フライアッシュを多量に使用した高流動コンクリートの配合設計手法

3. 実験概要

本研究における高流動コンクリートは、対象構造物の構造条件より、土木学会「高流動コンクリート施工指針」に示す自己充てん性ランク2を対象とした(表-1)。

3.1 使用材料

コンクリートの使用材料を表-2に示す。セメントおよびフライアッシュの品質を表-3に示す。

3.2 粉体の変形係数および拘束水比

フライアッシュ混合セメントペーストの相対フロー面積比と水粉体容積比の関係を図-2に示す。図-2より、フライアッシュ置換率に係わらず、両者は比例関係にある。その関係について単回帰分析を行い、得られた変形係数および拘束水比を表-4に示す。フライアッシュ置換率の増大に伴いフライアッシュ混合ペーストの変形係数および拘束水比は減少する。

表-1 自己充てん性ランク2

試験項目	目標値
流動性	スランプフロー(mm) 600~700
材料分離抵抗性	V漏斗流下時間(秒) 7~13
ボックス充てん高さ(mm)	300以上(障害R2)

表-2 使用材料

材料	記号	種類および品質
セメント	C	普通ポルトランドセメント
フライアッシュ	F	A火力発電所産, JIS品(II種)
細骨材	S	福島県高郷村産川砂, 表乾密度 2.57g/cm ³
粗骨材	G	福島県高郷村産川砂利(2505), 表乾密度 2.60g/cm ³
高性能AE減水剤	SP	主成分:ポリカルボン酸 酸基含有多元ポリマー
AE助剤	AE	主成分:高級脂肪酸塩および非イオン系界面活性剤

3.3 高流動コンクリートの配合

提案した配合設計方法に従って、土木学会「高流動コンクリート施工指針」の自己充てん性ランク2に合致したフライアッシュ置換率0%の基準

高流動コンクリートの配合を選定した。なお、細骨材容積比については、本研究に用いた細骨材の品質より0.45に設定した。

次に、決定した基準コンクリート配合より算出したモルタルの配合試験結果より、相対フロー面積比が5に相当する相対ロート速度比1.2を基準として、フライアッシュ混合配合の最適水粉体容積比を選定した。この最適水粉体容積比を用い、自己充てん性ランク2に合致したフライアッシュ高流動コンクリートの配合を試練りにより選定した。得られた配合を表-5に示す。

3.4 試験方法

高流動コンクリートの圧縮強度、乾燥収縮、耐凍害性、促進中性化、耐薬品性および急速塩化物イオン透過性の試験方法と試験体等を表-6に示す。

4. 試験結果および考察

4.1 圧縮強度

高流動コンクリートの圧縮強度を図-3に示す。フライアッシュ置換率に係わらず、材齢の経過に

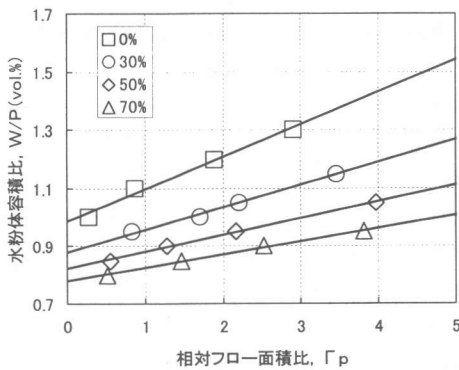


図-2 粉体の相対フロー面積比と水粉体容積比

伴い高流動コンクリートの圧縮強度は増大する。しかしながら、自己充てん性ランク2に適合するワーカビリティを確保した状態でフライアッシュ置換率を増大させた場合、高流動コンクリートの圧縮強度は低下する。また、高流動コンクリートのセメント水比と圧縮強度の関係(図-4)に示すように、セメント水比と圧縮強度の関係は材齢3日および7日ではほぼ直線関係にあり、それ以降の材齢ではいずれも上に凸の曲線関係にある。

表-3 セメントおよびフライアッシュの品質

項目	C	F
強熱減量 (%)		1.40
メチレンブルー吸着量 (mg/g)		0.26
密度 (g/cm ³)	3.15	2.33
比表面積 (cm ² /g)	3340	3740
フロー値比 (%)		108
活性度指数 (28日, %)		83

表-4 粉体の変形係数および拘束水比

フライアッシュ置換率 (%)	実験定数	
	変形係数 (Ep)	拘束水比 (Bp)
0	0.111	0.98
30	0.078	0.88
50	0.058	0.82
70	0.045	0.78

表-6 試験方法および試験体

項目	試験方法および試験体
圧縮強度	JIS A1108, φ10×20 cm, 水中養生 材齢: 3, 7, 14, 28および91日
乾燥収縮	JIS A 1129, 10×10×40cm, 水中養生 (7日) 材齢: 3, 7, 14, 28, 56および91日
耐凍害性	JSCE-G501, 10×10×40cm, 水中養生 材齢14日より試験開始, 30サイクル毎測定
促進中性化	日本建築学会 高耐久性鉄筋コンクリート構造設計施工指針(案)附1, 10×10×40cm 材齢: 7, 28, 56および91日
耐薬品性	JIS原案, 10×10×40cm 材齢: 7, 14, 21, 28および91日
急速塩化物イオン透過性	AASHTO DESIGNATION: T-277 ³⁾ (コンクリートの急速塩化物イオン透過性試験) φ10×5cm, 水中養生, 材齢28日に試験開始

表-5 高流動コンクリートの配合

コンクリートの種類	フライアッシュ置換率 (%)	水セメント比 (%)	水結合材比 (%)	水粉体容積比 (%)	単位粗骨材絶対容積 (m ³ /m ³)	単位量					混和剤	
						上段: 質量 (kg/m ³), 下段: 容積 (l/m ³)					上段: 種類, 下段: 添加量	
						W	C	F	S	G		
高流動コンクリート	0	30.9	30.9	97.2	0.31	175	567	0	745	806	SP	AE
						175	180	0	290	310	8.79	0.0153
	30	43.5	30.4	86.7	0.31	165	379	163	745	806	SP	AE
						165	120	70	290	310	8.32	0.0103
	50	60.5	30.2	81.0	0.31	159	263	263	745	806	SP	AE
						159	83	113	290	310	7.96	0.0079
	70	103.3	31.0	78.4	0.31	156	151	352	745	806	SP	AE
						156	48	151	290	310	7.55	0.0060

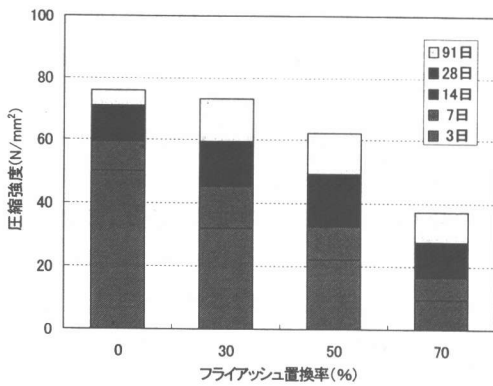


図-3 高流動コンクリートの圧縮強度

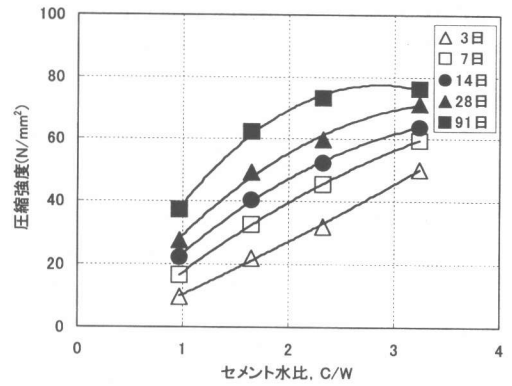


図-4 セメント水比と圧縮強度の関係

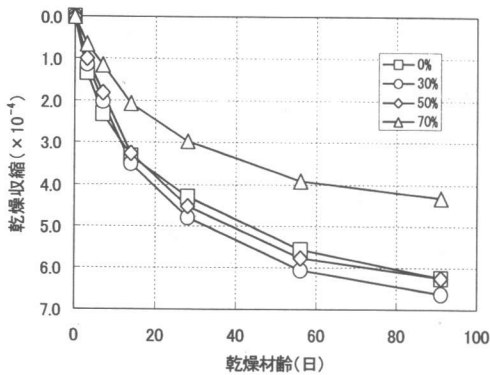


図-5 高流動コンクリートの乾燥収縮

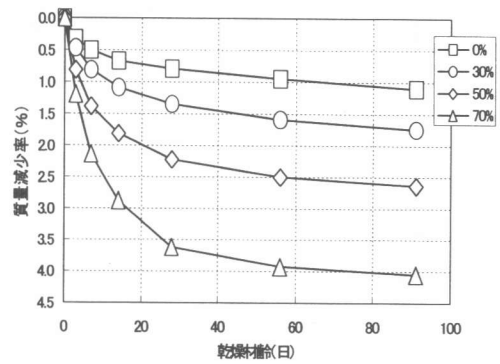


図-6 高流動コンクリートの質量減少率

特に、材齢 91 日においては、その曲線関係が一層明瞭化する。本高流動コンクリートにおいて、単位粉体容積が大略同程度であり、フライアッシュ置換率の増大に伴い、相対的に単位セメント量が減少する。そのため、初期材齢ではフライアッシュが不活性な粒子として存在し、強度発現はセメントの強度発現性に依存すると考えられる。また、長期材齢（材齢 91 日）では、セメントの水和反応による水酸化カルシウムの生成に伴い、強度発現に寄与するフライアッシュのポゾラン反応が、フライアッシュ置換率に応じて異なるものと推察される。

4.2 乾燥収縮

高流動コンクリートの乾燥収縮および質量減少率を図-5 および図-6 に示す。

フライアッシュ置換率 30~70% の高流動コンクリートにおいて、フライアッシュ置換率の増大に

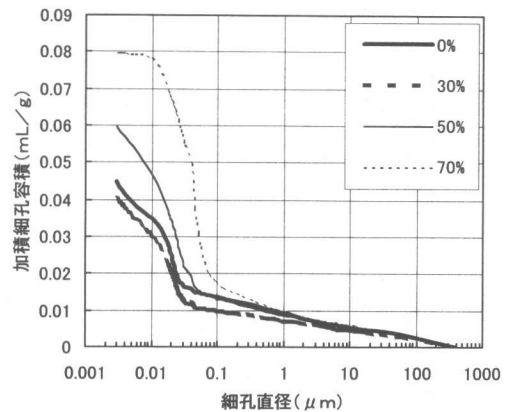


図-7 細孔容積の一例（材齢 28 日）

伴って、質量減少率は増大するが、乾燥収縮は小さくなる傾向にある。

材齢 28 日におけるコンクリートの細孔容積の一例を図-7 に示す。本高流動コンクリートにおいては、質量減少率が増加しても、その乾燥収縮は小

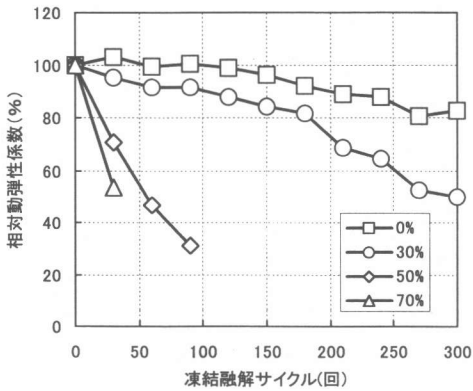


図-8 高流動コンクリートの相対動弾性係数

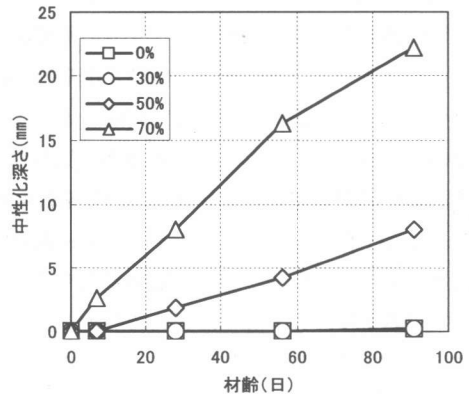


図-9 高流動コンクリートの中性化深さ

さい傾向にある。これは、本高流動コンクリートにおいては、図-7の細孔容積に示すようにフライアッシュ置換率の増加に伴って、その細孔径が増加するため、早期にセメントの水和に寄与しない見かけ上の水分が逸散して質量減少率は大きくなるが、小さな毛細管張力により乾燥収縮は低減したものと考えられる。

4.3 耐凍害性

高流動コンクリートの相対動弾性係数を図-8に示す。本高流動コンクリートにおけるフライアッシュ置換率0%の場合、耐久性指数83%を得ている。しかし、フライアッシュ置換率50、70%の場合には、耐久性指数は50%以下を示し、それらの置換率のコンクリートでは凍結融解抵抗性は無い。これは、耐凍結融解抵抗性に必要な強度 22N/mm^2 以上⁴⁾の強度を得ているが、フライアッシュ置換率の増加に伴いエントラップエアが多く存在し、水の凍結に対する膨張応力の緩和が充分でないことや、セメント硬化体のマトリックスの組織がポーラスになるに伴い透水性が増加し、劣化に関与する大きな毛細管空隙中の水が凍結膨張により硬化体を破壊することが考えられる。

4.4 促進中性化

高流動コンクリートの中性化深さを図-9に示す。フライアッシュ置換率0、30%の高流動コンクリートの中性化深さは材齢91日においてもほとんど進んでいない。一方、フライアッシュ置換率50、70%のものは、その置換率が大きくなる程、中性

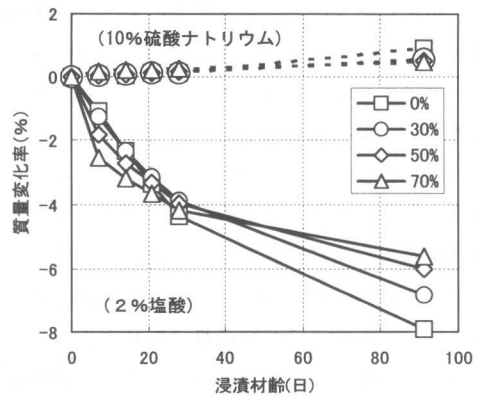


図-10 高流動コンクリートの耐薬品性

化深さが増加する。フライアッシュを用いたコンクリートの中性化深さは、通常、フライアッシュの置換率にかかわらず、材齢28日の圧縮強度と高い相関性があり、圧縮強度の減少に伴い増加する⁵⁾。本高流動コンクリートにおいては、前掲、フライアッシュ置換率の増加に伴い圧縮強度は低下しているため、緻密な硬化体組織が形成されていないことが考えられる。従って、フライアッシュ置換率の増加によりフライアッシュ混入セメント硬化体のマトリックスの組織がポーラスになり、二酸化炭素が拡散しやすくなること、フライアッシュの置換でその硬化体の水酸化カルシウム生成量が減少し、更に、ポズラン反応により水酸化カルシウムが消費され、マトリックス自身のpHが低下することにより、中性化深さは増加するものと推察される。

4.5 耐薬品性

2%塩酸および10%硫酸ナトリウムの水溶液に浸漬した高流動コンクリートの質量変化率を、図-10に示す。2%塩酸および10%硫酸ナトリウムに浸漬した場合、フライアッシュ置換率に係らず、浸漬材齢の経過に伴いコンクリートの質量は変化する。浸漬材齢91日では、フライアッシュ置換率の増加に伴って、コンクリートの質量変化率は2%塩酸では顕著に小さくなり、10%硫酸ナトリウムでは若干小さくなる。

4.6 塩化物イオンの透過性

高流動コンクリートの塩化物イオン透過量を図-11に示す。フライアッシュ置換により、塩化物イオン透過量はセメント単味を用いた高流動コンクリートに比べ小さくなるが、フライアッシュの置換率30~70%の範囲では、その置換率の増大に伴い、塩化物イオン透過量は増大する傾向にある。

通常、塩化物イオンの透過性は、コンクリートの細孔容積や分布に左右される。特に、普通セメント単味を用いた場合、 $0.1\mu\text{m}$ 以下の細孔容積の増加に伴い塩化物イオン透過量は低減するが、フライアッシュを混入した場合には必ずしも細孔容積の差により影響しないとの報告⁶⁾が有る。図-7に示した $0.1\mu\text{m}$ 以下の細孔容積は、フライアッシュ置換率の増加に伴い顕著に増加している。このことから、フライアッシュ混入による塩化物イオン透過量の低下は、細孔容積による影響の他に、細孔内における液相のイオン濃度（水酸化アルカリ）等にも影響されると推察される。

5. まとめ

本設計法により製造したフライアッシュを多量に使用した高流動コンクリートにおいて、材齢の経過に伴う強度発現や乾燥収縮は良好となり、普通セメント単味を用いた場合と比較して、耐薬品性は優れており、また、急速塩化物イオン透過性に小さい。しかし、フライアッシュ置換率の増加に伴って、中性化深さが増加の傾向にあることや、凍結融解抵抗性の耐久性指数が低下することの問題点が挙げられる。従って、今後、日本建築学会

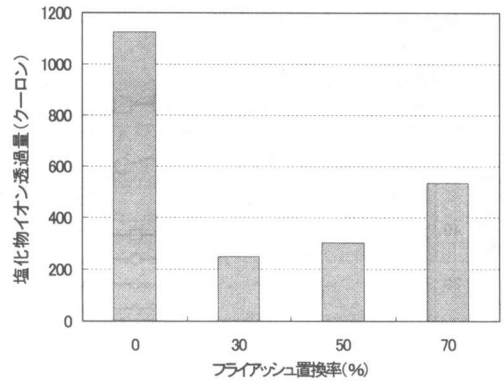


図-11 高流動コンクリートの塩化物イオン透過性

(高流動コンクリート)の規定25mm以下の中性化深さが得られるフライアッシュ置換率の範囲の設定や、消泡剤とAE助剤を使用して微細な気泡が多数連行できる工夫を実施することで、フライアッシュを多量に使用した高流動コンクリートの鉄筋コンクリート構造物への適用が可能になるものと考ええる。

参考文献

- 1) 成田 健, 加藤将裕, 井上和重: フライアッシュを多量に使用した高流動コンクリートの配合設計法の一提案と強度特性, コンクリート工学, Vol.38, No.6, pp.17-22, 2000.6
- 2) 岡村 甫, 前川宏一, 小澤一雅: ハイパフォーマンスコンクリート, 技法堂, 1993.9
- 3) American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Designation T-277 Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete
- 4) 長瀧重義, 大賀宏行, 嶋田久俊: フライアッシュを混和したコンクリートの耐凍害性評価, セメント技術年報41, pp.371-374, 1987
- 5) Nagataki, S., Ohga, H., and Kim, E.K.: Effect of curing conditions on the carbonation of concrete with fly ash and the corrosion of reinforcement in long term tests. In Proceedings, 2nd CANMET/ACI International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid, Spain, Apr, 21-25, 1986, pp.521~540
- 6) 笹谷輝彦, 鳥居和之, 川村満紀: 急速試験法(AASHTO T 277-83)による各種コンクリートの塩化物イオン透過性の評価, 土木学会論文集, No.564/V-35, pp.177-187, 1997.5